

# CELDA DE COMBUSTIBLE COMO ELEMENTOS POTENCIADORES PARA UN DESARROLLO ENERGÉTICO SUSTENTABLE

*José Juan Alvarado Flores<sup>1</sup>  
María Lilitana Ávalos Rodríguez<sup>2</sup>  
José Guadalupe Rutiaqui Quiñones<sup>3</sup>*

## RESUMEN

Las celdas de combustible generan electricidad y calor durante la reacción electroquímica que ocurre entre el oxígeno e hidrógeno para formar agua. La tecnología de la celda de combustible es un camino prometedor para proporcionar energía en áreas rurales, donde no hay acceso a la red eléctrica pública, o donde hay un costo enorme en el cableado y transferencia de electricidad. Además, las celdas de combustible, pueden emplearse como fuente de energía, para asegurar la energía eléctrica, por ejemplo, en fuentes de potencia ininterrumpidas, estaciones de generación de energía y sistemas de distribución. En este artículo, se hace un estudio comparativo sobre diseño básico, principios de funcionamiento, aplicaciones, ventajas y desventajas de las diversas tecnologías disponibles para celdas de combustible. Además, se comparan las características tecno-económicas de los vehículos que funcionan con celdas de combustible a partir de hidrógeno y vehículos con motor de combustión interna. Los resultados indican que los sistemas de celdas de combustibles tienen un diseño simple, confiabilidad alta, funcionamiento silencioso, alta eficiencia y menor impacto ambiental. El objetivo de este artículo, es servir de una conveniente referencia sobre la generación de energía a partir de las celdas de combustible.

**Palabras clave:** celda de combustible, vehículo con celda de combustible, análisis comparativo.

## 1. Introducción

Las celdas de combustible son básicamente sistemas termodinámicos abiertos. Operan en base a reacciones electroquímicas presentes y a los reactivos consumidos de una fuente externa (Connihan, 1981; Cook, 2001). Son alternativas favorables a los métodos convencionales de generación de energía eléctrica, con aplicación a escala menor. El hidrógeno y los combustibles hidrocarburos, contienen una cantidad importante de energía química en comparación con los convencionales materiales de baterías; por lo tanto, actualmente se han desarrollado para numerosas aplicaciones energéticas.

La tecnología de las celdas de combustible, es un prometedor sustituto de los combustibles fósiles para proveer de energía a las zonas rurales donde no hay acceso a la red pública o cuando el costo de cableado es enorme, así como la transferencia de electricidad. Además, las celdas de combustible se pueden emplear como fuente segura de energía eléctrica en sistemas de alimentación ininterrumpida

---

<sup>1</sup> Doctor en Ciencia de Materiales, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH, doctor.ambientalista@gmail.com

<sup>2</sup> Doctora en Ciencias del Desarrollo Regional, Centro de Investigación en Geografía Ambiental, UNAM, lic.ambientalista@gmail.com

<sup>3</sup> Doctor en Ciencias Forestales, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH, jrutiaga@yahoo.com.mx

(UPS), estaciones de generación de energía y sistemas de distribución. La tabla 1, muestra una comparación general entre los sistemas de celdas de combustible y otros sistemas de generación de energía (Nahar, 2011; Larminie, 2003; Winter, 2004).

La tabla 1, indica que el rendimiento más alto, se obtiene en los sistemas de celdas de combustible, en comparación con los sistemas convencionales de distribución de energía. Tienen un diseño simple y también funcionamiento confiable. Además, con el uso del hidrogeno como reactivo, estos sistemas resultan amigables con el medio ambiente produciendo energía limpia y de forma silenciosa (Zhang, 2002; Larrosa *et al.*, 2010; Xu H, 2004; Rayment, 2003; Grove, 1839). Actualmente, los sistemas de celdas de combustible se utilizan ampliamente en aplicaciones a pequeña y gran escala, por ejemplo, en los sistemas combinados de potencia y calor (CHP), sistemas móviles de alimentación, computadoras portátiles y equipo de comunicación militar.

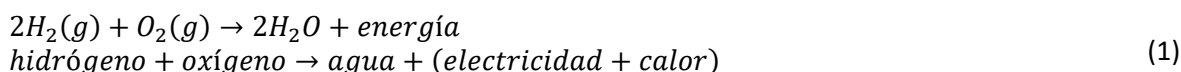
A pesar de todas estas ventajas, existen algunas limitaciones en el uso de las celdas de combustible. Por ejemplo, la vida útil de las celdas, se acorta debido al voltaje e impurezas en el flujo de gases utilizados. Otros retos para el desarrollo tecnológico de las celdas de combustible son: optimizar la densidad de potencia por unidad de volumen, accesibilidad y durabilidad de sus componentes. Cabe mencionar que, aunque por varios años no se observó un gran avance, es evidente el progreso de estos dispositivos en años recientes.

**Tabla 1.** Comparación de las celdas de combustibles con otros sistemas de generación eléctrica.

	Motor alternativo: diésel	Generador de turbina	Fotovoltaica	Turbina de viento	Celda de combustible
Rango de capacidad	500 kW – 50 MW	500 kW – 5 MW	1 kW – 1 MW	10 kW – 1 kW	200 kW – 2 MW
Eficiencia	35%	29 - 42%	6 - 19%	25%	40 - 85%
Costo de capital (\$/kW)	200 – 350	450 - 870	6600	1000	1500 - 3000
Costo de operación y mantenimiento (\$/kW)	0.005 - 0.015	0.005 - 0.0065	0.001 - 0.004	0.01	0.0019 - 0.0153

## 2. Principio de operación de las celdas de combustible

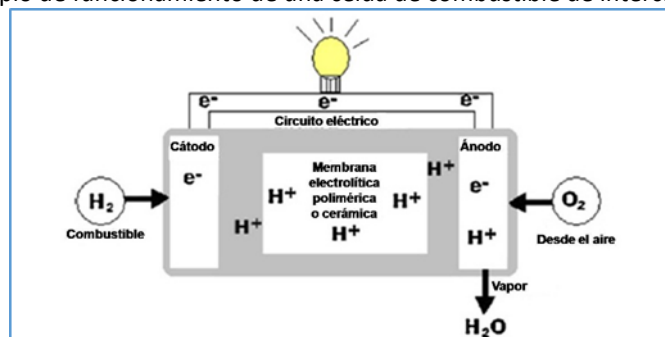
Las celdas de combustible generan electricidad y calor a través de una reacción electroquímica que en realidad es una reacción de electrólisis invertida. Esto sucede entre el oxígeno e hidrógeno para formar agua. Existe una variedad de diseños disponibles para celdas de combustible, sin embargo, todos ellos operan con los mismos principios básicos. La principal diferencia en el diseño de las celdas, se basa en las características químicas del electrolito utilizado en cada una (Cook, 2001). La ecuación 1, muestra la reacción electroquímica y la figura 1 representa el principio de funcionamiento de una celda de combustible.



Una celda de combustible se compone de cuatro partes principales: ánodo, cátodo, electrolito y el circuito externo. En el ánodo, el hidrógeno se oxida, con lo cual resultan protones y electrones, mientras que en el cátodo se reduce el oxígeno a especies óxido, las cuales reaccionan para formar agua. Dependiendo del electrolito, los protones o bien los iones óxido se transportan a través de un conductor iónico aislante, mientras que los electrones viajan a través de un circuito externo para liberar la energía

eléctrica (Mark, 2003). Sin embargo, generalmente las celdas de combustible producen cantidades muy pequeñas de corriente, debido a la reducida área de contacto entre los electrodos, electrolito y gas. Otro problema que se debe considerar es la distancia entre los electrodos. Para mejorar la eficiencia de la celda y maximizar el área de contacto, es necesario una delgada capa electrolítica y electrodos de alta porosidad para la óptima penetración del gas.

**Figura 1.** Principio de funcionamiento de una celda de combustible de intercambio protónico.



La reacción entre el oxígeno e hidrógeno para generar electricidad, es diferente en los distintos tipos de celdas de combustible. En un electrolito ácido, los electrones y protones ( $H^+$ ) son liberados a partir del gas de hidrógeno hacia el electrodo anódico. Los electrones generados pasan a través de un circuito externo y viajan hacia el cátodo mientras que los protones pasan a través del electrolito. Este intercambio libera energía eléctrica. Simultáneamente, en el lado del cátodo, el agua se forma como resultado de la reacción entre los electrones del electrodo y los protones del electrolito. Las reacciones presentes en el ánodo y cátodo se muestran a continuación:



Los electrolitos ácidos y ciertos polímeros que contienen iones de  $H^+$  libres, a menudo son llamados “membranas de intercambio protónico”. Son adecuadas y eficaces cuando se utilizan en funciones protónicas, debido a que únicamente permiten que los iones  $H^+$  pasen a través de ellas. En caso de que pasen electrones, la corriente eléctrica se reduce (Larminie, 2003).

### 3. Breve análisis sobre de los tipos de celdas de combustible

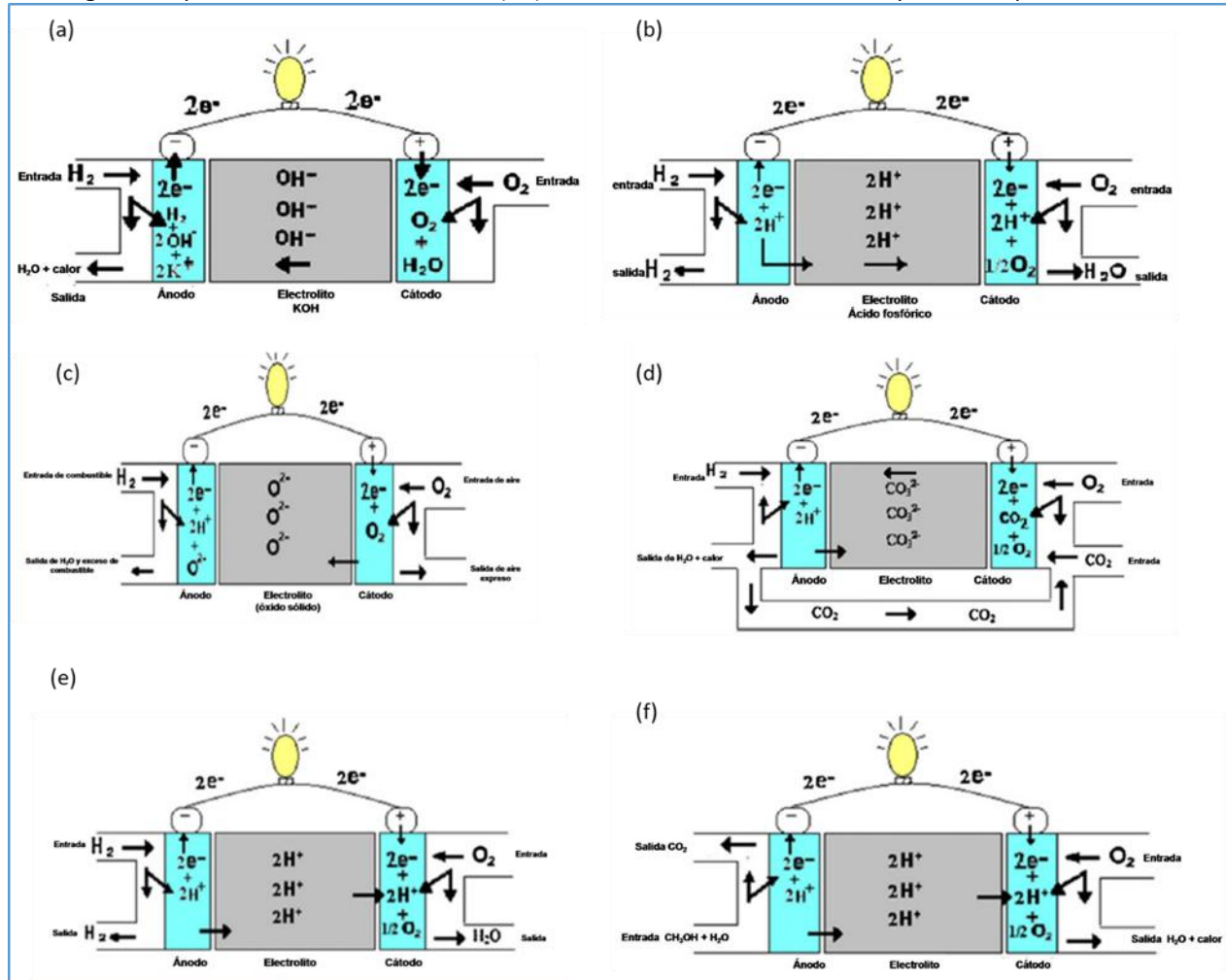
Las celdas de combustible (ver figura 1), se pueden clasificar de acuerdo a su temperatura de operación, eficiencia, aplicaciones y costo. En relación al tipo de electrolito utilizado se clasifican en seis grupos principales (Kirubakaran *et al.*, 2009):

- I. Celda de combustible alcalina (AFC)
- II. Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC)
- III. Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)
- IV. Celda de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)

V. Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)

VI. Celda de combustible de metanol directo (DMFC)

**Figura 2.** Tipos de celdas de combustible (a-f): AFC, PAFC, SOFC, MCFC, PEMFC y DMFC respectivamente.



### 3.1. Celda de combustible alcalina (AFC)

La celda AFC (Andújar y Segura, 2009), genera energía eléctrica por medio de un electrolito alcalino de hidróxido de potasio (KOH) en solución base agua. La presencia de los iones hidroxilo que viajan a través del electrolito, permite que exista un circuito eléctrico y así la energía eléctrica puede ser extraída. La figura 2(a), ilustra el mecanismo de operación de una celda de combustible alcalina.

En el ánodo, se combinan dos moléculas de hidrógeno gas con cuatro iones hidroxilo con carga negativa, liberándose cuatro moléculas de agua y cuatro electrones. La reacción de oxidación de este proceso, se puede considerar como (Alhassan y Garba, 2006):



Los electrones liberados, reaccionan con el cátodo a través de un circuito externo y reaccionen con el agua para generar iones ( $\text{OH}^-$ ). En el cátodo, una molécula de oxígeno se combina con dos moléculas de agua y absorben cuatro electrones para formar cuatro iones hidroxilo cargados negativamente. La reacción de reducción que se presenta, es (*Ibidem*):



Generalmente, la temperatura de funcionamiento de las celdas AFC, se encuentra en el rango de 60 a 90°C; sin embargo, en diseños recientes, estas celdas pueden operar a más bajas temperaturas entre 23 y 70°C. Las AFC se consideran celdas de combustible de baja temperatura con un costo de catálisis relativamente menor. El catalizador más común utilizado para acelerar las reacciones electroquímicas en el cátodo y ánodo en este tipo de celda de combustible es el níquel. La eficiencia eléctrica de la AFC, es de aproximadamente 60% y de más de 80% de eficiencia con CHP. En promedio, pueden generar electricidad con una potencia de hasta 20 kW (Crawley, 2006; Blomen y Mugerwa, 2013).

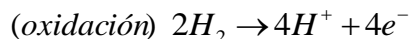
La NASA, fue la primera en usar las celdas AFC para abastecer de agua potable y energía eléctrica en las misiones del transbordador espacial. Actualmente, se emplean en submarinos, barcos, montacargas y en aplicaciones de transporte (Kordesch, 1999). Debido a su costo, las celdas AFC, se consideran las más económicas, ya que el electrolito que utilizan es hidróxido de potasio (KOH), el cual es un químico estandarizado. El catalizador para los electrodos es de níquel que no es costoso en comparación con otros tipos de catalizadores (metales nobles). Debido a la eliminación de placas bipolares, las celdas AFC, tienen estructuras simples. Estas, consumen hidrógeno y oxígeno puro para producir agua potable, calor y electricidad. El agua potable producida como sub-producto, es muy útil en naves y transbordadores espaciales. No producen emisión de gases con efecto invernadero y operan con alta eficiencia, aproximadamente 70%. A pesar de todas estas ventajas, las celdas AFC, sufren fácilmente de envenenamiento de dióxido de carbono. La solución alcalina base agua (KOH) utilizada como electrolito, absorbe  $\text{CO}_2$  en la conversión de KOH a carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) y, como consecuencia se obtiene el envenenamiento. Por lo tanto, las celdas AFC, suelen usar aire purificado u oxígeno puro, lo cual aumenta el costo de funcionamiento. Por lo tanto, uno de los retos en estas celdas, es encontrar un sustituto del KOH (Larminie, 2003; Crawley, 2006).

### 3.2. Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

Las celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC), utilizan electrodos de papel carbón y un electrolito líquido de ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). La solución de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (3.09% (H), 31.6% (P) y 65.3% (O)) es un líquido transparente e incoloro utilizado en fertilizantes, detergentes, saborizantes para alimentos y productos farmacéuticos. La conductividad iónica del ácido fosfórico, es baja en temperaturas reducidas entre 150 y 220°C. El portador de carga en este tipo de celda de combustible, es el ion hidrógeno ( $\text{H}^+$  o protón). Pasan del ánodo al cátodo a través del electrolito y los electrones generados, vuelven al cátodo a través del circuito externo y generan la corriente eléctrica. En el electrodo catódico, el agua se forma como resultado de la reacción entre los electrones, protones y el oxígeno en presencia de un catalizador de platino para acelerar las reacciones. Normalmente, el agua generada, se utiliza en aplicaciones de calentamiento. Cabe resaltar, que la operación continua del sistema a 40°C es una preocupación constante, debido a la solidificación del ácido fosfórico a esta temperatura (Remick *et al.*, 2010; National Fuel Cell Research Centre; 2009; Phosphoric acid fuel cell, 2010). La figura 2(b), muestra una celda PAFC.

Como se observa en la figura 1(b), el hidrógeno generado en el ánodo, se divide en cuatro protones y cuatro electrones. La reacción redox que tiene lugar en la oxidación del ánodo se muestra en la ecuación 6. Mientras que en el cátodo se tiene la reacción de reducción (Ec.7), donde cuatro protones y cuatro

electrones se combinan con el oxígeno para formar agua (National Fuel Cell Research Centre; 2009; Phosphoric acid fuel cell, 2010).



Los electrones y protones, pasan a través del circuito externo y electrolito respectivamente. Como resultado se tiene la generación de corriente eléctrica y calor. Normalmente, el calor se utiliza para el calentamiento del agua o generación de vapor a presión atmosférica, sin embargo, las reacciones del reformado de vapor, produce cierta cantidad de monóxido de carbono (CO) alrededor de los electrodos, lo cual puede producir envenenamiento en la celda PAFC y afectar severamente su rendimiento. La solución para reducir la absorción de CO, es aumentar el rango de tolerancia del ánodo en relación a su temperatura. En altas temperaturas, El CO se libera en sentido contrario en la reacción de electrocátalisis en el cátodo. Contrariamente, a otros electrolitos ácidos que necesitan agua para efectuar la conductividad, el ácido fosfórico concentrado en una PAFC, es capaz de operar en temperaturas mayores al punto de ebullición del agua.

Una celda PAFC no requiere oxígeno puro para su funcionamiento, ya que el CO<sub>2</sub> no afecta el electrolito o el rendimiento de la celda. También, se pueden operar fácilmente en combustibles fósiles reformados. Además, el ácido H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, posee baja volatilidad y aceptable estabilidad a largo plazo. El costo inicial de una PAFC, es alto, en razón a que utiliza aire con ~21% de oxígeno en lugar de oxígeno puro, lo cual reduce hasta tres veces, la densidad de corriente. Por lo tanto, las celdas PAFC están diseñadas en placas bipolares apiladas para aumentar el área del electrodo, y producir más energía, lo cual implica un alto costo inicial en esta tecnología. Actualmente, los sistemas PAFC están en la etapa comercial con capacidad de hasta 200 kW, además existen sistemas ya probados de mayor capacidad de hasta 11 MW. Las celdas PAFC, son de fabricación costosa, en relación a la necesidad que tienen de un recubrimiento de platino (catalizador) finamente dispersado en los electrodos. A diferencia de las celdas AFC, las impurezas del vapor de hidrógeno (CO<sub>2</sub>), no afectan a las PAFC. La eficiencia eléctrica de este tipo de celdas de combustible varía entre 40 y 50% y se obtiene eficiencia con CHP cerca del 85%. Suelen utilizarse en aplicaciones estacionarias in-situ (Remick *et al.*, 2010; National Fuel Cell Research Centre; 2009; Phosphoric acid fuel cell, 2010)**Error! Marcador no definido..**

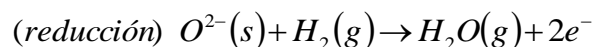
### 3.3. Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)

Las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC), son celdas de alta temperatura conformadas de un electrolito cerámico sólido. En la figura 2(c), se muestra una SOFC. Generalmente, las celdas SOFC, utilizan una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono formado internamente por el reformado del hidrocarburo como combustible, además del aire como oxidante (Mark, 2003). La circonia estabilizada con itria (YSZ) es el electrolito más utilizado para este tipo de celdas, debido a su elevada estabilidad química y térmica, además de su alta conductividad iónica (Will *et al.*, 2000; Singhal, 2000).

El oxígeno se reduce en la reacción de reducción del cátodo a 1000°C, mientras que la oxidación del combustible, sucede en el ánodo. El ánodo debe ser poroso para conducir combustible y transportar los productos de la oxidación lejos del electrolito y de la interface electrodo-combustible (Tanaka *et al.*, 2000; Sahibzada *et al.*, 1999).



(9)



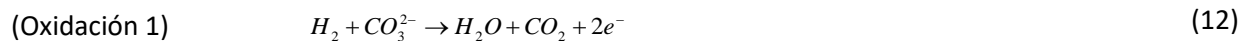
Las SOFC, son sistemas de generación de potencia de gran escala, con capacidad de cientos de MW. El calor generado como subproducto, generalmente, se utiliza para generar más electricidad, haciendo girar turbinas de gas y, por lo tanto, la eficiencia con CHP aumenta entre 70 y 80%. Los sistemas SOFC, son fiables, modulares y adaptables a varios combustibles con bajas emisiones de gases nocivos tales como  $NO_x$  y  $SO_x$ . Se pueden considerar como sistemas locales de generación de energía para zonas rurales que no tienen acceso a las redes públicas. Además, son de funcionamiento silencioso y mantenimiento de bajo costo. Por otro lado, el largo tiempo requerido para iniciar su operación y de enfriamiento, así como diversos problemas de compatibilidad química y mecánica de sus componentes, limita el uso de este tipo de celdas. Varios investigadores (Singhal, 2000; Tanaka *et al.*, 2000; Sahabzada *et al.*, 1999; Hibino *et al.*, 2000; Shao *et al.*, 2004) han estudiado las posibles soluciones para reducir la temperatura de operación, lo cual pudiera ser la clave para que las SOFC, sean la nueva generación de dispositivos en la producción de energía eléctrica a gran escala.

### 3.4. Celda de combustible de carbonatos fundidos (MCFC)

Las celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC), son celdas de alta temperatura. Utilizan como electrolito, (electrolito-sólido-Beta-alúmina; BASE) una mezcla de sales de carbonatos fundidos, suspendidos en una matriz cerámica porosa e inerte químicamente (Ovshinsky *et al.*, 2006). En la figura 2(d), se ilustra este tipo de celda. En una MCFC, la reacción en el ánodo, se produce entre el combustible (hidrógeno) y los iones de carbonato, que reaccionan para formar dióxido de carbono, agua y electrones. En el ánodo, el gas de alimentación (generalmente metano  $CH_4$ ) y el agua  $H_2O$ , se convierten en hidrógeno ( $H_2$ ), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ).



Simultáneamente, dos reacciones electroquímicas consumen hidrógeno y monóxido de carbono, generando electrones en el ánodo. Ambas reacciones (12) y (13) utilizan los iones carbonatos ( $CO_3^{2-}$ ) disponibles en el electrolito:



La reducción ocurre en el cátodo y son expulsados nuevos iones carbonatos a partir del oxígeno ( $O_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Entonces, los iones carbonatos producidos en el cátodo, se transfieren a través del electrolito hacia el ánodo. La corriente eléctrica y el voltaje de la celda, se transporta a través de los electrones (Chudej *et al.*, 2008).

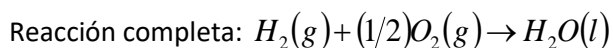


Actualmente, las celdas MCFC, son empleadas en diversas aplicaciones como centrales eléctricas de servicio público, industria y servicios militares. Las ventajas y desventajas de las celdas MCFC, están estrechamente relacionadas con su alta temperatura de funcionamiento. Estas celdas, pueden ser alimentadas directamente con hidrógeno, monóxido de carbono, gas natural y propano. No requieren catalizadores de metales nobles para la oxidación y reducción electroquímica. Asimismo, no requieren de ningún desarrollo de infraestructura para su instalación, sin embargo, se requiere mucho tiempo para

obtener la temperatura de funcionamiento adecuada y generación de energía (Chudej *et al.*, 2008; Molten Carbonate Fuel Cell, 2010; Gon Lee *et al.*, 2003).

### 3.5. Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)

En las celdas PEMFC, el hidrógeno es activado por catálisis para formar iones protónicos y dirigir los electrones hacia el ánodo. El protón pasa a través de la membrana mientras que el electrón es forzado a fluir por un circuito externo y por lo tanto generar electricidad. Entonces, el electrón regresa al cátodo, donde interactúa con el oxígeno y el ion protónico para formar agua. Las reacciones químicas que tienen lugar en cada electrodo, se presentan en las ecuaciones (15) y (16). La celda PEMFC se ilustra en la figura 2(e).



Básicamente, la celda PEMFC, se compone de placas bipolares y un ensamble de membranas electrónicas. Este ensamble, se compone de una capa catalizadora dispersa, una capa de carbono o de difusión del gas y la membrana. La membrana sirve para transportar los protones desde el ánodo al cátodo y bloquear el paso de los electrones, así como de los reactivos. El objetivo de la capa de difusión del gas, es acceder al combustible de manera uniforme. Los electrones en el ánodo pasan a través del circuito externo y generan electricidad. Las celdas PEMFC, funcionan a baja temperatura entre 60 y 100°C. Son sistemas ligeros, compactos y el proceso de inicio de su funcionamiento es rápido. El sellado de los electrodos en una PEMFC, es más fácil que con otro tipo de celdas, debido a la solidez del electrolito. Además, tienen un tiempo de vida más largo y su fabricación es más económica (Sopian, 2005; Therdthianwong *et al.*, 2011; Comparison of fuel cell technologies, 2008). Cabe resaltar que, el costo total de un auto con el sistema PEMFC, varía de 500-600 dólares por kW, el cual es 10 veces más costoso en comparación con los automóviles que utilizan motor de combustión interna (IEC) (Tsuchiya y Kobayashi, 2004). El costo total también incluye los costos de montaje, placa bipolar, electrodo de platino, la membrana y elementos periféricos. Desde el punto de vista de eficiencia, a mayor temperatura de operación, la eficiencia aumenta significativamente. Esto se debe a la mayor velocidad de reacción. Sin embargo, con una temperatura de trabajo superior a 100°C, el agua se puede evaporar y causaría deshidratación a la membrana, la cual permite la reducción en la conductividad protónica. La eficiencia eléctrica de estas celdas de combustible, se encuentra entre 40 y 50%, y la potencia de salida de hasta 250kW. Los sistemas PEMFC, suelen utilizarse en aplicaciones portátiles y estacionarias. Sin embargo, entre sus aplicaciones, el transporte, parece ser el más apropiado, ya que proporciona un suministro continuo de energía eléctrica con altos niveles de eficiencia y densidad de potencia. Requieren un mínimo de mantenimiento, debido a que no hay partes móviles en el apilamiento de la celda. Los vehículos que funcionan a partir de celdas de combustible (FCV), son la aplicación más prometedora de los sistemas PEMFC. La razón es, la aceptación social en el desarrollo de esta tecnología. Un informe de McNicol y colaboradores (McNicol *et al.*, 2001), establece que un FCV puede tener un mayor éxito que un vehículo convencional ICE. Sin embargo, el costo inicial de un auto FCV es mucho mayor que un ICE.



### 3.6. Celda de combustible de metanol directo (DMFC)

La celda de combustible de metanol directo (DMFC), son un tipo de celdas parecidas al a las PEMFC. Son una fuente de energía para fines portátiles, debido a la baja temperatura de operación, larga vida útil y rápido reabastecimiento de combustible. Además, no requieren recargarse y son consideradas como fuentes de energía limpia y renovable. La figura 2(f), ilustra una celda DMFC. La fuente de energía de estas celdas es el metanol. En el ánodo, el metanol se transforma a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) mientras que en el cátodo se forma agua o vapor con el oxígeno disponible en el aire. Las reacciones se muestran en las ecuaciones (18) y (19):



Generalmente, las celdas DMFC, se clasifican en sistemas activos y pasivos. Los activos, son sistemas altamente eficientes y confiables. Están constituidos por una bomba para la alimentación del metano, un separador de  $\text{CO}_2$ , el apilado de la celda, un sensor para el metanol, bomba de circulación y controladores de la bomba. El uso de la bomba para la circulación del agua, puede aumentar la eficiencia de cada sistema de forma significativa. Los sistemas activos, normalmente se utilizan en aplicaciones de control, por ejemplo: velocidad de flujo, concentración y temperatura. En los sistemas de DMFC pasivos, se eliminan los dispositivos de bombeo y de proceso externo para soplar aire en la celda. Por lo tanto, el oxígeno del aire del ambiente se difunde al cátodo. Similarmente, el metanol se difunde en el ánodo a partir de un depósito de alimentación integrado e impulsado por un gradiente de concentración entre el ánodo y el depósito. Los sistemas pasivos son económicos, sencillos y capaces de una reducción sustancial de pérdidas de potencia parásita, así como del volumen del sistema. El metanol se utiliza en las celdas DMFC en forma de vapor o líquido. Es preferible la alimentación por vapor que, por líquido, en relación al voltaje y densidad de potencia. Cabe mencionar que, el metanol no realiza de forma adecuada la operación de transferencia de masa y requiere de alta refrigeración localizada en el ánodo. Además, la cantidad de metanol que traspasa del ánodo al cátodo y liberación de gas en la superficie electrocatalizadora, conduce a un menor rendimiento del líquido en la celda (Scott *et al.*, 1999). Por otro lado, las celdas alimentadas con vapor, presentan algunos inconvenientes como deshidratación de la membrana, tiempo de vida corto, así como alta temperatura para la vaporización del combustible. Por consiguiente, se requiere de un reformador más complejo y, por lo tanto, costoso. Además, no son adecuadas para aplicaciones portátiles (celdas alimentadas con vapor).

En una celda DMFC, se considera a la membrana de intercambio protónico (PEM), como la parte principal, la cual proporciona baja penetrabilidad y alta conductividad protónica. Además, permite alta estabilidad térmica y química para el reformado de la celda. Los polímeros más utilizados para el intercambio perfluorado iónico son el Flemion de Chemical Asahi y el Nafion de Dupont. Estos polímeros, tienen tanto resistencia mecánica como alta hidrofobicidad al ácido sulfúrico, que es más predominante, debido a la presencia de agua. Como consecuencia de ello, la transferencia de agua y metanol a través de la membrana ácida perfluorosulfónica que es un medio de cruce del metanol, tiene un impacto negativo en su rendimiento (Hatanaka *et al.*, 2002; Kreuer, 2001). La PEM se puede modificar para superar este problema de 2 formas: sulfonación y preparación de una membrana compuesta mediante la incorporación de materiales cerámicos inorgánicos (Silva *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2005).

#### 4. Comparación de las diferentes tecnologías de las celdas de combustible

Las aplicaciones de las celdas de combustible, dependen del tipo de celda a utilizar. Considerando los diferentes tipos de celdas, es necesario aclarar qué tipo de tecnología es la más adecuada, para una aplicación determinada. Las celdas de combustible generan energía eléctrica en un amplio rango de potencias desde 1 a 10 MW, por lo que pueden ser empleadas en casi cualquier aplicación donde se necesite energía. Se pueden emplear en una gama de pequeños dispositivos, por ejemplo, en equipos electrónicos personales tales como: teléfonos móviles y computadoras personales (PC). Las aplicaciones a media escala incluyen los vehículos de celda de combustible, aparatos domésticos, aplicaciones militares y transporte público. Finalmente, se pueden utilizar en infinidad de aplicaciones utilizando sistemas de distribución de energía eléctrica (1-10MW) de óptima calidad en comunidades de difícil acceso a donde sea muy costosa la implementación del equipo para la generación de electricidad. La tabla 2, presenta las aplicaciones, ventajas y características principales en las celdas de combustible. La eficiencia y costos específicos de plantas convencionales con CHP (cogeneración de energía a partir de calor) para diferentes sistemas de celdas de combustible, se tabulan en la tabla 3. Los rangos de capacidad de potencia eléctrica varían entre 100 y 300 kW (Andújar y Segura, 2009; Wongyao *et al.*, 2010; Ni H-j *et al.*, 2010; Lokurlu *et al.*, 2003; Qi A. *et al.*, 2007).

**Tabla 2.** Comparación de las características técnicas de las celdas de combustible

Tipo de celda de combustible	Temperatura de operación (°C)	Potencia de salida (kW)	Eficiencia eléctrica (%)	Eficiencia con sistema de potencia y calor combinados (CHP)	Aplicaciones	Ventajas
Celda de Combustible Alcalina ( <i>Alkaline Fuel Cell, AFC</i> )	90 - 100	10 - 100	60	>80	-Militar -Espacial	-La reacción catódica es más rápida en electrolitos alcalinos -Permite alto rendimiento -Puede utilizar una variedad de catálisis (electrodos)
Celda de Combustible de Ácido fosfórico ( <i>Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC</i> )	150 – 200	50 - 1000	>40	>85	-Distribución de energía	-Alta eficiencia con CHP -Aumenta la tolerancia a impurezas en el hidrógeno
Celda de Combustible de Óxido Sólido	600-1000	>1 - 3000	35 - 43	<90	-Potencia auxiliar -Alta distribución	-Alta eficiencia -Flexibilidad del combustible -Puede utilizar una

(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)					de energía	variedad de catálisis (electrodos) -Electrolito más delgado (reduce la caída óhmica) -Mantenimiento mínimo -Capacidad para CHP -Ciclo híbrido/GT
Celda de Combustible de Carbonatos Fundidos (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)	600-700	<1-1000	45 - 47	>80	-Alta distribución de energía	-Alta eficiencia -Flexibilidad del combustible -Puede utilizar una variedad de catálisis (electrodos) -Capacidad para CHP
Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)	50 – 100 (>100 electrolito ≠ Nafion)	<1 - 250	53 – 58	70 – 90	-Energía portátil -Distribución de baja energía -Vehículos espaciales -Transporte	-El electrolito sólido reduce los problemas de corrosión -Mantenimiento mínimo -Temperatura de operación baja -Rápido inicio de funcionamiento
Celda de Combustible de Metanol Directo (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)	20 – 90	0.001-100	40	80	- Computadoras y otros servicios portátiles	-Arranque rápido, reducción de costos.

**Tabla 3.** Costo comercial de celdas de combustible en plantas con sistema combinado de calor y potencia.

	PEMFC (BPS) <sup>a</sup>	PAFC (ONSI) <sup>b</sup>	MCFC (MTU) <sup>c</sup>	SOFC (SWPC) <sup>d</sup>
Potencia eléctrica (kWe)	250	200	280	100
Eficiencia (%)	34	38	48	47
Costo (€/kWe)	~10,000	~ 5000	~8000	~20,000

<sup>a</sup> BPS: Sistema de potencia Ballard, por ejemplo BEWAG Berlín 250 kWe PEMFC, gas natural, cogeneración.

<sup>b</sup> ONSI: PAFC 200 kWe, gas natural, cogeneración.

<sup>c</sup> MTU: Módulo de alta temperatura, por ejemplo, modelo Stardwerke Bielefeld, RWE, MCFC de 250 kWe, gas natural, cogeneración.

<sup>c</sup> MTU: Módulo de alta temperatura, por ejemplo, modelo Stardwerke Bielefeld, RWE, MCFC de 250 kWe, gas natural, cogeneración.

<sup>d</sup> SWPC: Corporación Siemens WestingHouse, SOFC de 100 kWe, cogeneración.

## 5. Vehículo eléctrico con celda de combustible (FCEV)

Existen numerosas aplicaciones de las celdas de combustible. Cada aplicación exige sus propios requisitos. La mayoría de las aplicaciones de las celdas de combustible se pueden clasificar como:

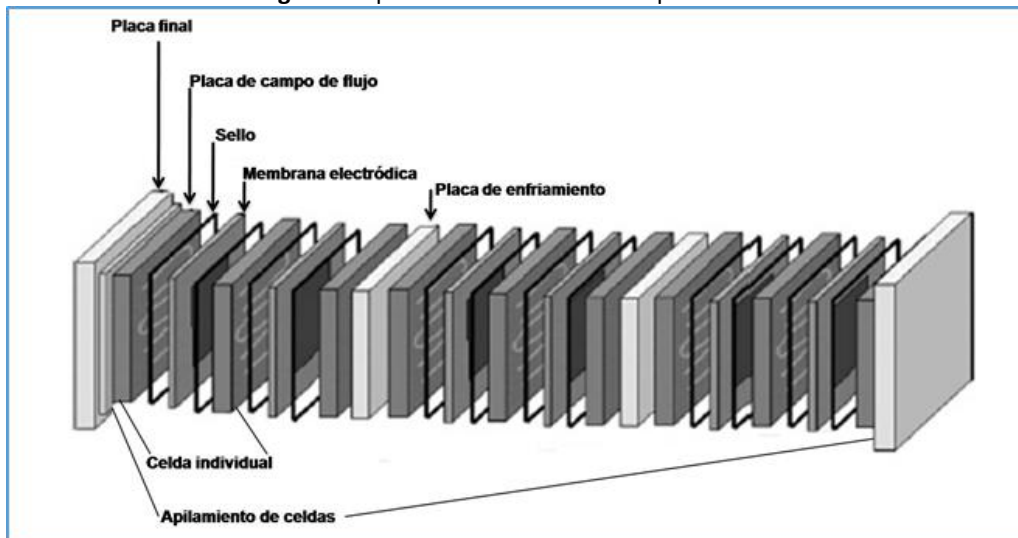
- I. Aplicaciones de alta potencia: telecomunicaciones, instalaciones de alta tecnología y procesamiento de datos.
- II. Minimización o eliminación de emisiones: áreas urbanas, instalaciones industriales, aeropuertos, coches, autobuses y regiones con estrictos estándares de emisiones.
- III. Aplicación en zonas con acceso limitado a la red de suministro eléctrico: usos portátiles y áreas remotas.
- IV. Aplicabilidad en el manejo de gases de residuos biológicos: plantas tratadoras de residuos.

De todas las aplicaciones de las celdas de combustible, su uso en un vehículo tipo FCEV, ha atraído la mayor atención en los últimos años. Casi todos los fabricantes de vehículos, actualmente presentan investigación y desarrollo (R&D) en FCEV. Estos, son un tipo especial de vehículos eléctricos construidos con una estructura diferente al motor de combustión interna. En los vehículos convencionales con combustible a diésel o gasolina, la energía es transmitida a partir del combustible desde el motor a las ruedas por un tren de tracción mecánica; sin embargo, en un FCEV, la potencia del tren se obtiene a partir de la electricidad. Estudios recientes (Bitsche *et al.*, 2004), indican que un automóvil híbrido con celda de combustible (FCV) en combinación de celdas de combustible y un sistema de batería, proporciona en su totalidad mayor eficiencia en comparación cuando solo se utiliza un FCEV. Por lo tanto, la preocupación más importante es diseñar y desarrollar dispositivos híbridos tipo FCVs. Para mejorar la eficiencia de un vehículo mediante el uso de un dispositivo de almacenamiento, se recomienda utilizar una batería o un ultra capacitor “nivelador de carga”. Otra sugerencia, es regenerar la potencia de frenado y utilizarla para la aceleración y en pendientes o subidas prolongadas.

Comúnmente, se utiliza un apilamiento de celdas PEMFC, como fuente de energía para un FCEV, debido a su baja temperatura de operación (cerca de 80°C), densidad de potencia, corriente, tamaño compacto, es ligera, rápida inicialización del sistema y rápido ajuste en la potencia de salida. La tabla 4, muestra los fabricantes de automóviles involucrados en la investigación y desarrollo (R&D) de FCEVs. La tabla 4 indica que la mayoría de los fabricantes están utilizando el arreglo de la celda PEMFC. En la figura 3, se muestra un ejemplo del apilado de una celda de combustible.

**Tabla 4.** Fabricantes de automóviles involucrados en la investigación y desarrollo de vehículos eléctricos que utilizan celdas de combustible (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV).

Compañía	Tipo de sistema	Celda de combustible	Combustible
Daimler-Chrysler	Celda de combustible continua-batería híbrida	Directa-Indirecta	Hidrógeno-Metanol
Ford	Celda de combustible continua	Directa/indirecta	Hidrógeno/Metanol
General Motors	Celda de combustible-batería híbrida	Directa/indirecta	Hidrógeno/Metanol
Honda	Celda de combustible-ultra capacitor híbrido	Directa/indirecta	Hidrógeno/Metanol
Mazda	Celda de combustible- batería híbrida	Directa	Hidrógeno
Nissan	Celda de combustible- batería híbrida	Indirecta	Metanol
Renault	Celda de combustible- batería híbrida	Directa	Hidrógeno
Toyota	Celda de combustible- batería híbrida	Directa/indirecta	Metanol
Volkswagen	Celda de combustible continua -batería híbrida	Directa/indirecta	Hidrógeno-Metanol
ZeTech	Celda de combustible- batería híbrida	Directa	Hidrógeno

**Figura 3.** Apilamiento de una celda tipo PEMFC.

## 6. Celda de combustible de hidrógeno vs vehículos con motor de combustión interna

Las celdas de combustible generan electricidad como resultado de las reacciones electroquímicas. La principal diferencia en comparación con una batería normal, es que las celdas de combustible son sistemas de generación de energía, mientras que, las baterías son generalmente dispositivos de almacenamiento. En las celdas de combustible, se presenta una reacción entre las moléculas de oxígeno e hidrógeno para formar agua y electricidad, sin embargo, en el proceso de electrólisis, el oxígeno e hidrógeno son expulsados debido al paso de la electricidad a través del agua.

La carga eléctrica externa (motor eléctrico) en un auto, produce un gradiente eléctrico y causa que los electrones fluyan a través de él. Los fabricantes como BMW, General Motors, Nissan, Daimler-Chrysler, Honda, Toyota y Hyundai; han concentrado sus investigaciones en vehículos más eficientes impulsados

por hidrógeno. Debido a su eficiencia, los vehículos FCV, son prometedores sustitutos de los autos ICEV, además son más simples, el combustible utilizado es abundante y seguro, sin impactos ambientales (contaminación nula). Cabe mencionar que, con la misma cantidad de combustible, generan mayor potencia de salida en comparación con los motores de combustión interna convencionales ICEVs. Las celdas de combustible, tienen una potencia de salida en el rango de 20 y 250 kW, sin embargo, una celda de combustible individual, no puede proporcionar la energía suficiente para poner en movimiento un auto. Por lo tanto, se requiere de un “apilamiento de celdas de combustible”, es decir, una combinación de varias celdas unidas para generar la suficiente energía y hacer funcionar un automóvil.

La eficiencia de las celdas de combustible es 30 a 90% mayor que un ICEV que usa gasolina regular. La ventaja más importante y obvia de un vehículo tipo FCV de hidrógeno, es que tienen cero emisiones contaminantes. En otras palabras, los vehículos con sistema de energía de celdas de combustible, representan un impacto ambiental bastante reducido, ya que solo producen calor, agua y electricidad. En un auto convencional (ICEV) que utiliza gasolina como combustible, se tienen subproductos como: óxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Larminie, 2003; Wang *et al.*, 2005; Lgot, 2002).

Los vehículos FCEVs tienen una estructura muy simple en comparación con los autos ICEVs. Son dispositivos que no presentan gran cantidad de partes móviles, y, por lo tanto, son silenciosos y de baja vibración. Se elimina la necesidad del aceite de lubricación en los sistemas con FC, mediante la reducción de partes mecánicas, por lo que se reducen los gastos de mantenimiento. El tren de potencia del vehículo, esta incrustado en el área de las llantas, de tal manera que el compartimento del motor en el lado frontal del vehículo, también se elimina. Por consiguiente, los dispositivos FCV de hidrógeno son de diseño sencillo, altamente confiables y de funcionamiento silencioso, lo cual permite tener un sistema de larga duración. Sin embargo, al comparar los vehículos tipo FCEV y ICEV, se debe tomar en cuenta un análisis económico, así como las diferencias en el costo (Lgot, 2002; Zamel, 2006; European Commission, 2003). Por ejemplo, se debe considerar la costosa distribución de la infraestructura para automóviles con celda de combustible (FCV). El costo aproximado de un reformador de hidrógeno en una celda es de US \$5000, mientras que el costo de la fabricación de un motor convencional esta alrededor de US \$3000. El costo de una FCV de hidrógeno oscila entre US \$1500 y US \$3000/kW, mientras que el costo de un ICE es de US \$50/kW.

Además, las estaciones para el servicio de hidrógeno, requieren de un alto costo de capital para ser construida, aproximadamente US \$470,000. La modificación de una estación de gas de tamaño promedio costaría alrededor de US \$70,000. Por lo tanto, el precio de los vehículos FCV de hidrógeno, debe disminuir y además se requieren de otras mejoras económicas para poder efectuar la fase comercial. El primer auto FCEV fue presentado por la empresa Ford. Era bastante caro, sin embargo, la producción en masa ayudó notablemente a reducir los costos (Larminie, 2003).

Investigaciones recientes, mencionan que, en Canadá, el costo aproximado de un auto con celda de combustible es de US \$28,300 comparado con US \$21,700 de un automóvil con motor de combustión interna (Zamel, 2006). Los resultados muestran hasta un 30% de diferencia. La tabla 5, compara el precio de los vehículos actuales ICEV con los autos del futuro de celdas de combustible con hidrógeno FCEV. Se observa que la celda de combustible contribuye en un gasto bastante alto al costo total del sistema. A pesar de que el costo en un auto tipo FCEV es mayor que el ICEV, los costos de funcionamiento y mantenimiento parecen ser convincentes a largo plazo (FCEV).

**Tabla 5.** Costos comparativos entre el auto convencional de combustión interna y el vehículo eléctrico con celda de combustible.

<b>Sistema de propulsión</b>	<b>SI ICE</b>	<b>FC Híbrido</b>
Combustible	Gasolina	Hidrógeno
Tipo de vehículo	Pasajero	Pasajero
Costo inicial	US \$21,717.65	US \$21,717.65
<i>Motor</i>		
Crédito por Reducción de dimensión		-US \$6000.00
<i>Sistema de celda de combustible</i>		
Celda de combustible		US \$5195.04
Tanque de combustible		US \$975.00
Motor eléctrico		US \$1558.51
Transmisión de una etapa		US \$226.50
Batería		US \$2597.52
Gases de escape		-US \$645.00
<i>Vehículo</i>		
Reducción del peso		US \$2400.00
Aerodinámica		US \$225.00
<i>Costo total del vehículo</i>	US \$21,717.65	US \$28,250.22

## 7. Conclusión

Se han estudiado los diferentes tipos de celdas de combustible con el objetivo de aclarar la mejor aplicación para cada tipo. Se ha discutido que, aunque todos los tipos de celdas funcionan sobre una base similar; en términos de eficiencia de energía, la alcalina es la más eficiente (60%), seguida por la celda de membrana de electrolito polimérico (58%) y por último la de carbonatos fundidos (47%). Mientras que las celdas AFCs son las más eficientes, la PEMFC es ideal para aplicaciones del transporte tales como automóviles y autobuses. Las celdas DMFC y PAFC son viables económicamente, sin embargo, sufren de baja eficiencia. Las celdas SOFC Y MCFC tienen alto rendimiento y eficiencia en combinación tipo CHP. La comparación de los costos de capital estimado entre un ICEV y un FCEV muestra que, aunque este último es más caro debido a los costos involucrados con las modificaciones para el sistema de hidrógeno e infraestructura para su distribución, son más convincentes a largo plazo debido al costo operacional y mecánico. Las tecnologías actuales de las celdas de combustible, necesitan ser económicamente más accesibles y superar las ventajas de las tecnologías existentes, para que sean más aceptables y por lo tanto poderse producir en masa. Con el fin de mejorar la viabilidad y aumentar la eficiencia de los autos tipo FCEV, debe realizarse más investigación y desarrollo en institutos de investigación e industrias. Las celdas de combustible ofrecen grandes ventajas importantes sobre el motor de combustión interna (ICE) y otros sistemas actuales generadores de energía.

## Referencias

- Alhassan M, Garba MU.** Design of an alkaline fuel cell. Minna: Federal University of Technology; 2006.
- Andújar JM, Segura F.** Fuel cells: history and updating. A walk along two centuries. *Renew Sustain Energy Rev* 2009; 13:2309–22.
- Bitsche O, Gutmann G.** Systems for hybrid cars. *J Power Sources* 2004;127 (1–2):8–15.
- Blomen, L. J., & Mugerwa, M. N.** (Eds.). (2013). Fuel cell systems. Springer Science & Business Media.
- Chudej K, Bauer M, Pesch HJ, Schittkowski K.** Numerical simulation of a molten carbonate fuel cell by partial differential algebraic equations. Universität Bayreuth; 2008.
- Comparison of fuel cell technologies.** DOE Energy Efficiency and Renewable Energy Information Center; 2008. Available online at: <http://www.hydrogen.energy.gov>.
- Connihan MA.** Dictionary of energy. Routledge and Kegan Paul; 1981.
- Cook B.** An introduction to fuel cells and hydrogen technology. Vancouver, Canada: Heliocentris; 2001.
- Crawley G.** Fuel cell today. Johnson Matthey Plc. 04241894; 2006, March. Available online at: <http://www.fuelcelltoday.com>.
- European Commission.** Hydrogen energy and fuel cells, a vision of our future; 2003.
- Gon Lee C, Sam Kang B, Kung Seo H, Chun Lim H.** Molten carbonate fuel cell. United States Patent Application Publication. Pub. No.: US 2003/0072989 A1.
- Grove WR.** On voltaic series and the combination of gases by platinum. *Philos Mag J Sci* 1839; XIV:127–30.
- Kirubakaran A, Jain S, Nema RK.** A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renew Sustain Energy Rev* 2009; 13:2430–40.
- Kordesch K.** Alkaline fuel cells applications, innovative energy technology. Austria: Institute of High Voltage Engineering, U Graz; 1999.
- Hatanaka T, Hasegawa N, Kamiya A, Kawasumi M, Morimoto Y, Kawahara K.** Cell performances of direct methanol fuel cells with grafted membranes. *Fuel* 2002;81(December (17)):2173–6.
- Hibino T, Hashimoto A, Inoue T, Tokuno J, Yoshida S, Sano M.** A lowoperating- temperature solid oxide fuel cell in hydrocarbon–air mixtures. *Science* 2000;16(June):288.
- Kreuer KA.** On the development of proton conducting polymer membranes for hydrogen and methanol fuel cells. *J Membr* 2001;185(1):29–39.
- Larminie J, Dicks A.** Fuel cell system explained. 2nd ed. United Kingdom: John Wiley & Sons; 2003.
- Larrosa-Guerrero A, Scott K, Head IM, Mateo F, Ginesta A, Godinez C.** Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. *Fuel* 2010;89(December (12)):3985–94.



**Igot F.** Faceoff: internal combustion engine versus the hydrogen fuel cell. Montgomery College Student J Sci Math 2002;1.

**Lokurlu A, Grube T, H hlele B, Stolten D.** Fuel cells for mobile and stationary applications-cost analysis for combined heat and power stations on the basis of fuel cells. Int J Hydrogen Energy 2003; 28:703–11.

**Mark Ormerod R.** Solid oxide fuel cells, the royal society of chemistry. Chem Soc Rev 2003; 32:17–28.

**McNicol BD, Rand DAJ, Williams KR.** Fuel cells for road transportation purposes—yes or no? J Power Sources 2001;100 (1-2):47–59.

**Molten Carbonate Fuel Cell, Wikipedia, the free encyclopaedia.** Available online at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Molten carbonate fuel cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Molten_carbonate_fuel_cell) [accessed 08.03.10].

**Nahar G, Kendall K.** Biodiesel formulations as fuel for internally reforming solid oxide fuel cell. Fuel Process Technol 2011;92 (July (7)):1345–54.

**Ni H-j, Zhang C-j, Wang X-x, Ma S-y, Liao P.** Performance of special-shaped direct methanol fuel cell with sol–gel flux phase. J Fuel Chem Technol 2010;38(October (5)):604–9.

**Ovshinsky SR, Venkatesan S, Corrigan DA.** Molten carbonate fuel cell. United States Patent Application Publication. Pub. No.: US 2006/0204830 A1.

**Phosphoric acid fuel cell.** Irvine: National Fuel Cell Research Centre, University of California; 2009. Available online at: <http://www.nfcrf.uci.edu/EnergyTutorial/pafc.html>.

**Phosphoric acid fuel cell (PAFC).** The U.S. Department of Defense (DoD) Fuel Cell Test and Evaluation Centre (FCTec); 2010. Available online at: <http://www.fctec.com/fctec/about.asp>.

**Qi A, Peppley B, Karan K.** Integrated fuel processors for fuel cell application: a review. Fuel Process Technol 2007;88 (January (1)):3–22.

**Rayment C, Sherwin S.** Introduction to fuel cell technology. Notre Dame, IN, USA: Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame; 2003, May.

**Remick RJ, Wheeler D, Singh P.** MCFC and PAFC R&D workshop summary report. U.S. Department of Energy; 13 January 2010.

**Sahibzada M, Steele BCH, Barth D, Rudkin RA, Metcalfe IS.** Operation of solid oxide fuel cells at reduced temperatures. Fuel 1999;78(May (6)): 639–43.

**Scott K, Taama WM, Argyropoulos P.** Engineering aspects of the direct methanol fuel cell system. J Power Sources 1999;79(1):43–59.

**Shao Z, Sossina M, Halle A.** high-performance cathode for the next generation of solid–oxide fuel cells. Nature 2004;9(September):431.

**Silva V, Ruffmann B, Silva H, Mendes A, Madeira M, Nunes S.** Mass transport of direct methanol fuel cell species in sulfonated poly (ether ether ketone) membranes. J Electrochim 2006;51(May (18)):3699–706.

**Silva VS, Weisshaar S, Reissner R, Ruffman B, Vetter S, Mendes A, et al.** Performance and efficiency of a DMFC using non-fluorinated composite membranes operating at low/medium temperatures. *J Power Sources* 2005;145(2):485–94.

**Singhal SC.** Advances in solid fuel cell technology. *Solid State Ionics* 2000; 135:305–13.

**Sopian K.** Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. Elsevier Ltd.; 2005.

**Tanaka K, Wen C, Yamada K.** Design and evaluation of combined cycle system with solid oxide fuel cell and gas turbine. *Fuel* 2000; October (79) (12):1493–507.

**Therdthianwong A, Saenwiset P, Therdthianwong S.** Cathode catalyst layer design for proton exchange membrane fuel cells. *Fuel*, in press, Corrected Proof, Available online 21 July 2011.

**Tsuchiya H, Kobayashi O.** Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve. *Int J Hydrogen Energy* 2004;29(10):985–90.

**Wang C, Zhou S, Hong X, Qiu T, Wang S.** A comprehensive comparison of fuel options for fuel cell vehicles in China. *Fuel Process Technol* 2005;86(April (7)):831–45.

**Will J, Mitterdorfer A, Kleinlogel C, Perednis D, Gaukler LJ.** Fabrication of thin electrolytes for second-generation solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics* 2000; 131:79–96.

**Winter M, Brodd RJ.** What are batteries, fuel cells, and super capacitors? *Chem Rev* 2004; 104:4245–69.

**Xu H, Kong L, Wen X.** Fuel cell power system and high power dc–dc converter. *IEEE Trans Power Electron* 2004; 19:1250–5.

**Wongyao N, Therdthianwong A, Therdthianwong S.** The fading behavior of direct methanol fuel cells under a start-run-stop operation. *Fuel* 2010;89(May (5)):971–7.

**Zhang X, Shen Z.** Carbon fiber paper for fuel cell electrode. *Fuel* 2002;81 (December (17)):2199–201.

**Zamel N.** Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada. *J Power Sources* 2006; 155:297–310.